

# Echtzeitmessung von Traktionsparametern eines Traktors bei der Bodenbearbeitung

Jan Wieckhorst, Thomas Fedde, Ludger Frerichs

Der Systemwirkungsgrad eines Traktors bei der schweren Bodenbearbeitung wird von den Verlusten bestimmt, die aus dem Reifen-Boden-Kontakt resultieren. Der Bediener kann diese Verluste durch eine angepasste Ballastierung und einen angepassten Reifendruck minimieren. Eine Analyse des Stands der Forschung zeigt, dass es für eine Optimierung des Traktionswirkungsgrads nicht ausreicht, den Reifendruck bis an die Reifentragfähigkeitsgrenze abzusenken. Vielmehr muss der optimale Reifendruck für die aktuellen Traktionsbedingungen ermittelt werden. Hierfür wurden mit einem Versuchstraktor Reifen-Boden-Kennfelder für verschiedene Reifendrücke aus Sensordaten erzeugt und bewertet. Die Untersuchungen bestätigen zunächst, dass das Arbeiten an der Reifentragfähigkeitsgrenze nicht in jedem Fall zu maximalem Traktionswirkungsgrad führt. Die Bewertung unterschiedlicher Reifendrücke anhand der Kennfelder eignet sich bei homogenen Traktionsbedingungen, während die Bewertung bei heterogenen Traktionsbedingungen weiter erforscht werden muss.

## Schlüsselwörter

Traktoren, Traktion, Reifendruckregelung, Reifen-Boden-Kennfelder, Optimierung, Sensorik

Der Traktor hat sich im Laufe der Entwicklung vom einfachen Pferdersatz für Zugarbeiten auf Feld und Straße zu einer multifunktionalen mobilen Arbeitsmaschine entwickelt; er ist gleichsam die Schlüsselmaschine der technisierten Landwirtschaft. Möglich wurde dies durch die Einführung genormter Schnittstellen zum Anbauen und Anhängen von Geräten sowie zur Leistungsübertragung vom Traktor auf das Gerät. Schwere Zugarbeiten auf landwirtschaftlichen Böden dominieren auch heute noch das Einsatzprofil eines Traktors. Der Traktionswirkungsgrad ist hierbei aufgrund des betriebswirtschaftlichen Stellenwertes des Kraftstoffverbrauchs im Ackerbau und den mit dem Kraftstoffverbrauch korrelierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Praxis von größter Relevanz (FRERICHS et al. 2017). Abbildung 1 zeigt beispielhaft ein Leistungsflussdiagramm eines Traktors bei schweren Zugarbeiten.

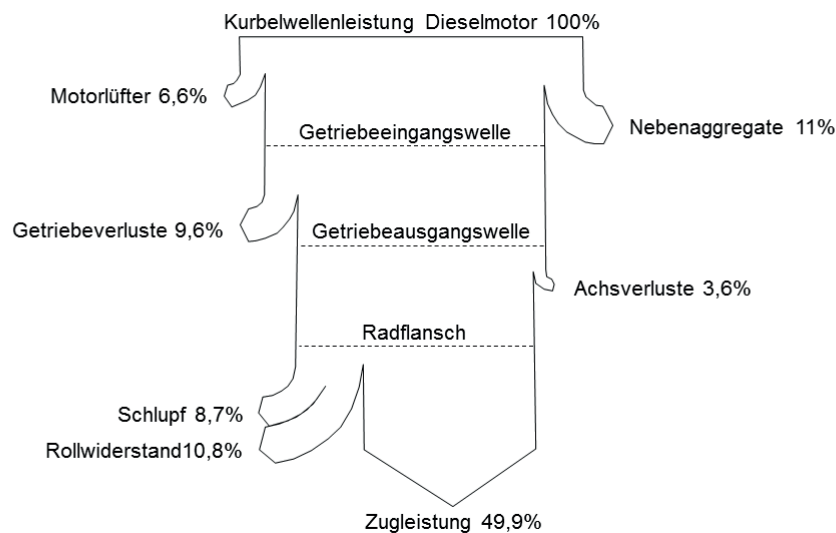


Abbildung 1: Leistungsfluss eines Traktors bei schweren Zugarbeiten auf landwirtschaftlichem Boden nach PICHLMAIER (2012)

Die größten Verluste bei der Wandlung der Kurbelwellenleistung des Dieselmotors in Zugleistung treten im Reifen-Boden-Kontakt in Form von Schlupf- und Rollwiderstandsverlusten auf. Durch eine Ballastierung des Traktors und eine Reifendruckanpassung können diese Verluste minimiert werden. Bei der Einstellung des Reifendrucks ist zu beachten, dass die Reifentragfähigkeit, also die maximal zulässige vertikale Radkraft, vom Reifendruck abhängt. In diesem Zusammenhang wird häufig die Reifenauslastung angegeben. Die Reifenauslastung entspricht dem Quotienten aus der aktuellen vertikalen Radkraft und der bei der aktuellen Fahrgeschwindigkeit und dem aktuellen Reifendruck maximal zulässigen vertikalen Radkraft. Eine Reifenauslastung von 100 % bedeutet also, dass der Reifen an der Reifentragfähigkeitsgrenze betrieben wird. Gemäß einer weit verbreiteten Faustregel gilt ein möglichst niedriger Reifendruck bei Zugarbeiten als wirkungsgradgünstig. Untersuchungen von STEINKAMPF (1986), REMPFER (2003) und WETTEMANN (2012) zeigen jedoch, dass das Arbeiten an der Reifentragfähigkeitsgrenze nicht in jedem Fall wirkungsgradoptimal ist.

STEINKAMPF (1986) publizierte über 700 Reifen-Boden-Kennfelder, welche an der Forschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig mit einer Testeinrichtung auf landwirtschaftlichen Böden gemessen wurden. Bei der von STEINKAMPF gewählten Darstellung der Traktionsparameter über dem Schlupf steigt der Traktionswirkungsgrad zunächst steil über dem Schlupf an und fällt nach dem Erreichen des Wirkungsgradmaximums nahezu linear ab (Abbildung 2). Bei den Versuchen mit Diagonalreifen auf schweren Böden mit Stoppelbewuchs wird der maximale Traktionswirkungsgrad bei einer Reifendruckvariation unter Ceteris-paribus-Bedingungen nicht für den am niedrigsten eingestellten Reifendruck erreicht. Abbildung 2a zeigt den Verlauf des Traktionswirkungsgrads auf lehmigen Ton mit unbearbeiteten Stoppen für einen Reifendruck von 1,4 und 1,1 bar. In diesem Fall ergibt sich im gesamten Kennfeld ein höherer Traktionswirkungsgrad für den höheren Reifendruck von 1,4 bar. Auf gepflügtem lehmigem Sand mit den gleichen Reifen zeigen die Kennfelder hingegen, dass der niedrigere Reifendruck von 1,1 bar zu höheren Traktionswirkungsgraden führt (Abbildung 2b). Der von STEINKAMPF gemessene Rollwiderstand steigt durch das Absenken des Reifendrucks an, was sich negativ auf den Traktionswirkungsgrad auswirkt. Die Steifigkeit der Karkasse von Diago-

nalreifen ist höher als die Steifigkeit der Karkasse von Radialreifen. Das vermehrte Walken der Reifenflanken bei abgesenktem Reifendruck führt bei Diagonalreifen grundsätzlich zu einem stärkeren Anstieg des inneren Rollwiderstands als bei Radialreifen mit vergleichsweise flexiblen Reifenflanken.

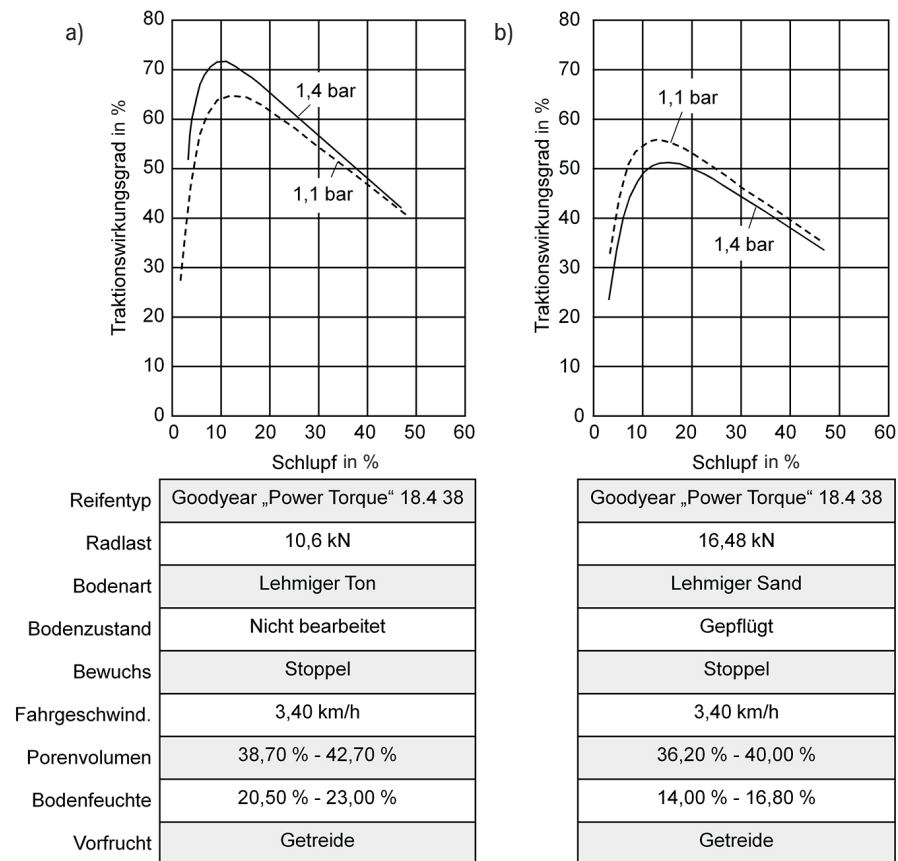


Abbildung 2: Reifen-Boden-Kennfelder – Traktionswirkungsgrad aufgetragen über dem Schlupf bei unterschiedlichen Traktionsbedingungen und Reifeninnendrucke (STEINKAMPF 1986)

REMPFER (2003) erarbeitete die Grundlagen zur Reifendruckeinstellung bei Traktoren. Dabei wurden sowohl konzeptionelle Fragen zum Systemaufbau und -verhalten beantwortet als auch der Einfluss des Reifendrucks auf das Lastkollektiv sowie wichtige Traktionsparameter eines Traktors untersucht. Die Traktionsparameter wurden von REMPFER mit einem mit Messtechnik ausgestatteten Versuchstraktor gemessen. In Abbildung 3 sind die beim Tiefenlockern mit Standardreifen auf toniger Parabraunerde mit verschiedenen Reifendrücken gemessenen Triebkraft- und Rollwiderstandsbeiwerte sowie Schlupfwerte und Traktionswirkungsgrade dargestellt. Der maximale Traktionswirkungsgrad ergibt sich bei 0,8 bar Reifendruck und nicht mit voller Reifenauslastung bei 0,6 bar Reifendruck. Grund hierfür ist der beim Absenken des Reifendrucks von 0,8 auf 0,6 bar ansteigende Rollwiderstandsbeiwert bei nahezu konstantem Triebkraftbeiwert und Schlupf.

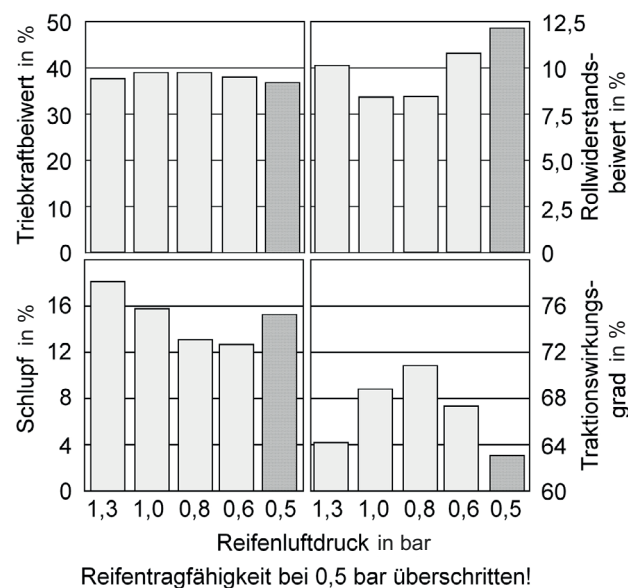


Abbildung 3: Traktionsparameter eines Traktors beim Tiefenlockern mit verschiedenen Reifendrücken (REMPFER 2003)

WETTEMANN (2012) verglich den Kraftstoffverbrauch und den Schlupf eines Traktors bei Zugarbeiten auf trockenem, lehmigen Sand. Die Messungen wurden mit und ohne Ballastierung des Traktors bei 1,6, 0,8 und 0,6 bar Reifendruck durchgeführt. Für die Messfahrt mit 0,8 bar Reifendruck ergab sich der geringste Kraftstoffverbrauch und Schlupf (Abbildung 4). WETTEMANN erklärte dies mit einem durch die vergrößerte Kontaktfläche abgesenktem Kontaktflächendruck bei minimalem Reifendruck, welcher bei den vorliegenden Traktionsbedingungen zu einer Verschlechterung der Kraftübertragung im Reifen-Boden-Kontakt und damit zu einem Schlupfanstieg führt.

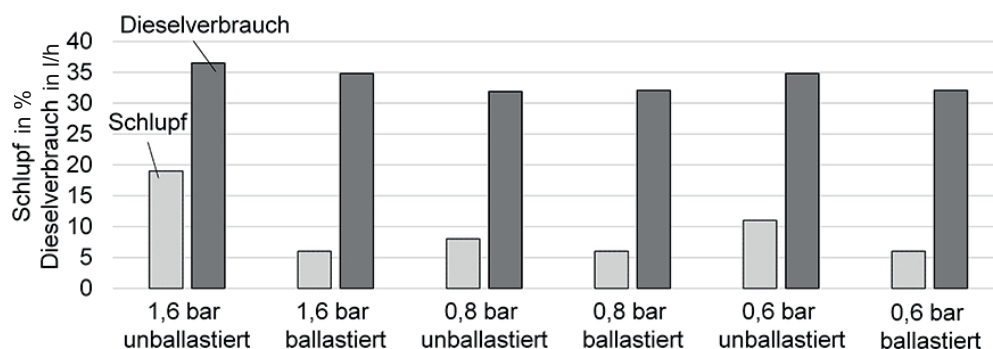


Abbildung 4: Schlupf und Dieselverbrauch bei Zugarbeiten auf lehmigen Sand bei verschiedenen Reifendrücken (WETTEMANN 2012)

### Verfahren zur Optimierung des Traktionswirkungsgrads durch eine Reifendruckanpassung

Mit welchem Reifendruck der größtmögliche Traktionswirkungsgrad erreicht wird, hängt von den jeweiligen Einsatzbedingungen ab. Für eine Optimierung des Traktionswirkungsgrads durch eine Reifendruckanpassung reicht es nicht aus, lediglich die bei verschiedenen Reifendrücken gemessenen Traktionswirkungsgrade miteinander zu vergleichen. Bei der Bewertung unterschiedlicher Reifendrücke hinsichtlich der erreichbaren Traktionswirkungsgrade muss die Lage des Betriebspunktes

im Reifen-Boden-Kennfeld beachtet werden. Zur Veranschaulichung ist der Traktionswirkungsgrad in Abbildung 5 im Unterschied zur Darstellung in Abbildung 2 nicht über dem Schlupf, sondern über dem Triebkraftbeiwert aufgetragen. Bei dieser Form der Darstellung steigt der Traktionswirkungsgrad über dem Triebkraftbeiwert zunächst steil an und fällt nach dem Erreichen des – im Vergleich zur Darstellung über dem Schlupf – breiteren Bereichs des Wirkungsgradmaximums bei höheren Triebkraftbeiwerten wieder steil ab.

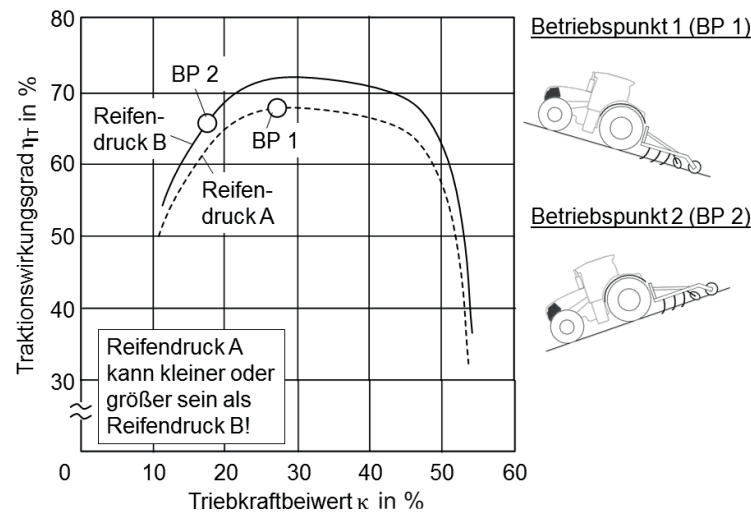


Abbildung 5: Vergleich zweier Betriebspunkte im Reifen-Boden-Kennfeld hinsichtlich der erreichbaren Traktionswirkungsgrade bei unterschiedlichen Reifendrücken nach WIECKHORST et al. (2017)

Der Traktionswirkungsgrad  $\eta_T$  berechnet sich als Quotient aus der Ausgangs- und Eingangsleistung des Fahrwerks (Gleichung 1):

$$\text{Traktionswirkungsgrad: } \eta_T = \frac{P_{aus}}{P_{ein}} = \frac{v \cdot F_T}{\omega \cdot M} \quad (\text{Gl. 1})$$

Bezogen auf das Einzelrad ist die Ausgangsleistung das Produkt aus Arbeitsgeschwindigkeit  $v$  und Radtriebkraft  $F_T$ , während die Eingangsleistung dem Produkt aus Radwinkelgeschwindigkeit  $\omega$  und -drehmoment  $M$  entspricht. Der Triebkraftbeiwert  $\kappa$  entspricht dem Verhältnis aus der horizontalen Fahrwerkskraft und der vertikalen Fahrwerkskraft (Gleichung 2):

$$\text{Triebkraftbeiwert: } \kappa = \frac{F_T}{F_G} \quad (\text{Gl. 2})$$

Bezogen auf das Einzelrad ist die Radtriebskraft  $F_T$  die horizontale Fahrwerkskraft und die Radlast  $F_G$  die vertikale Fahrwerkskraft. Betriebspunkt 1 in Abbildung 5 befindet sich auf der Wirkungsgradkennlinie von Reifendruck A im Wirkungsgradmaximum bei einem Triebkraftbeiwert von 27 %. Betriebspunkt 2 befindet sich auf der Wirkungsgradkennlinie von Reifendruck B weiter links im Kennfeld bei einem Triebkraftbeiwert von 17 %. Obwohl die Wirkungsgradkennlinie für Reifendruck B im gesamten Kennfeld über der Kennlinie für Reifendruck A liegt, führt ein Vergleich der in den beiden Betriebspunkten erreichten Traktionswirkungsgrade zu der Fehlbewertung, dass mit Reifendruck A höhere Traktionswirkungsgrade erreichbar sind als mit Reifendruck B. Die unterschiedliche Lage der Betriebspunkte auf der Kennlinie für den jeweiligen Reifendruck kann in der Praxis auch bei konstanter Arbeitstiefe und Geschwindigkeit verursacht werden, wenn der Traktor in Betriebspunkt 1 zum Beispiel hangaufwärts arbeitet und neben der Zugkraft des Gerätes auch den Steigungswiderstand überwinden muss, während der Traktor in Betriebspunkt 2 hangabwärts arbeitet, sodass die Hangabtriebskräfte von Traktor und Gerät anteilig in Fahrtrichtung wirken.

Bei der Bewertung unterschiedlicher Reifendrucke hinsichtlich der erreichbaren Traktionswirkungsgrade müssen Reifen-Boden-Kennfelder aus Sensordaten generiert werden. Der Traktionswirkungsgrad wird hierfür über dem Triebkraftbeiwert aufgetragen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Auswertung zweier Kennfelder  $RK$  und  $RK^*$ , welche jeweils bei unterschiedlichen Reifendrücken erzeugt wurden. Der Vergleich der mit den unterschiedlichen Reifendrücken erreichten Traktionswirkungsgrade ist nur im Bereich der Überlappung der Kennfelder zulässig. Zur Bewertung der Reifendrucke werden die Werte aller Klassen beider Kennfelder  $RK$  und  $RK^*$  im Bereich zwischen dem jeweils größeren der unteren Triebkraftbeiwerte  $\kappa_{min}$  und dem jeweils kleineren der oberen Triebkraftbeiwerte  $\kappa_{max}$  aufsummiert.

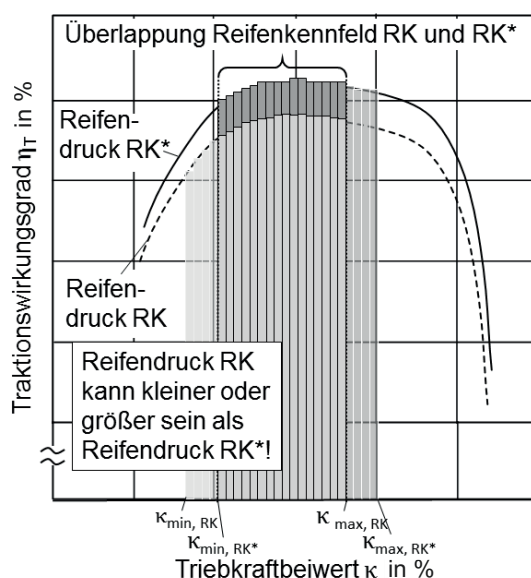


Abbildung 6: Auswertung der aus Sensordaten erzeugten klassierten Reifenkennfelder nach WIECKHORST et al. (2017)

Im Anschluss wird die Summe aller Klassen des niedrigeren Reifendrucks im Überlappungsbereich vom höheren Reifendruck subtrahiert (Gleichung 3).

$$\sum_{\kappa_{min,RK^*}}^{\kappa_{max,RK}} \eta_{T,RK^*}(\kappa) - \sum_{\kappa_{min,RK^*}}^{\kappa_{max,RK}} \eta_{T,RK}(\kappa) \quad (\text{Gl. 3})$$

Ist das Ergebnis positiv, so bedeutet dies, dass mit dem Reifendruck  $RK^*$  höhere Traktionswirkungsgrade erreicht werden als mit dem Reifendruck  $RK$ . Ist das Ergebnis negativ, führt der Reifendruck  $RK$  zu höheren Traktionswirkungsgraden.

Für die Bewertung unterschiedlicher Reifendrücke ist zu beachten, dass die Kennfelder jeweils bei konstanten, also homogenen Traktionsbedingungen erzeugt werden. Werden die bei heterogenen Traktionsbedingungen gesammelten Sensordaten in ein Reifen-Boden-Kennfeld geschrieben, so entsteht ein arithmetisch gemitteltes Reifen-Boden-Kennfeld. Dieses bildet nicht das Traktionsverhalten des verwendeten Reifens bei einem bestimmten Reifendruck auf einem bestimmten Boden mit einem bestimmten Bodenzustand ab, sondern – durch die Mittelwertbildung der auf verschiedenen Böden und Bodenzuständen gemessenen Traktionsparameter – ein theoretisches Traktionsverhalten. In dieser Studie wurden die Kennfelder mit dem Versuchstraktor unter homogenen Traktionsbedingungen erzeugt.

### Traktionssensorik im Traktor

Die für das Generieren der Kennfelder am Hinterrad des Versuchstraktors verwendeten Sensoren sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Arbeitsgeschwindigkeit wurde mit einem GPS-Sensor ermittelt, welcher an der Kabine des Traktors befestigt war. Die Winkelgeschwindigkeit des Hinterrades wurde unter Berücksichtigung der Übersetzungen im Antriebsstrang aus der Drehzahl der Getriebeausgangswelle berechnet. Aufgrund des Drehzahlausgleichs des Hinterachsdifferentials ist bei den Messungen darauf zu achten, dass nur mit aktivierter Differentialsperre bzw. bei Geradeausfahrt und gleichen Kraftschlussbedingungen an den Hinterrädern des Traktors gearbeitet wird. Die vertikalen und horizontalen Radkräfte sowie das Raddrehmoment wurden von einer neuartigen Traktionssensorik am Hinterrad des Traktors gemessen, welche auf dem Prinzip der inversen Magnetostriktion basiert und in anderen Veröffentlichungen bereits ausführlich vorgestellt worden ist (WIECKHORST et al. 2015, PEETERS et al. 2017). Die Sensorik war nicht, wie in Abbildung 7 dargestellt, auf der linken Seite montiert, sondern nur im rechten Achstrichter. Als Referenz für die von der Traktionssensorik gemessenen horizontalen Radkraft (Radtriebkraft) wurde der Versuchstraktor bei Inbetriebnahme außerdem mit einer Kugelkopfkupplung ausgerüstet, an welcher die Schnittstellenkräfte mit Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst wurden.



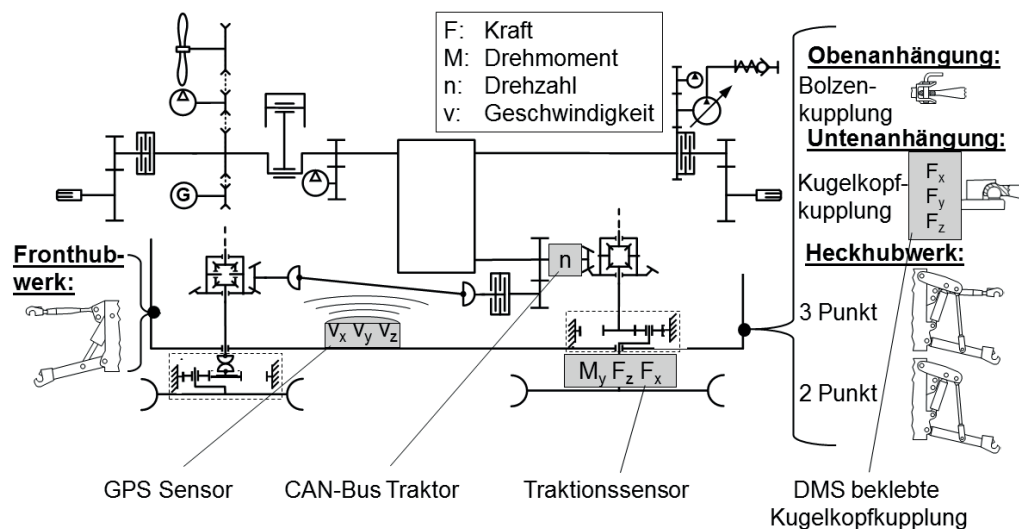


Abbildung 7: Sensoren im Antriebsstrang des Versuchstraktors nach WIECKHORST et al. (2015)

### Inbetriebnahme der Traktionssensorik im Versuchstraktor

Nach dem Einbau der Sensorik in den Versuchstraktor wurden zunächst einige Untersuchungen auf Asphalt durchgeführt. Hiermit wurde zum einen die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Prüfstandversuchen auf die im Traktor verbaute Traktionssensorik sichergestellt, zum anderen die Plausibilität der Traktionsparameter, die aus den Sensorsignalen berechnet wurden.

Abbildung 8 zeigt die Signale für die horizontale und vertikale Radkraft beim Anheben eines Heckgewichts über der Zeit. Außerdem sind die abgelesenen Anzeigewerte der Wiegeplatte des Hinterrades für das abgesenkte und das angehobene Heckgewicht in das Diagramm eingezeichnet. Das Heckgewicht wird nach etwa 10 Sekunden angehoben und nach etwa 40 Sekunden wieder abgesenkt. Die maximale Abweichung der abgelesenen Anzeigewerte der Wiegeplatte und des Signals für die vertikale Radkraft der Traktionssensorik beträgt in der abgesenkten Position 0,5 kN und in der angehobenen Position 0,4 kN. Das Signalrauschen im Verlauf der vertikalen Radkraft im Bereich zwischen 20 und 30 s wird durch das Ab- und Aufsteigen zum Ablesen der Wiegeplatten verursacht. Betrachtet man das Signal für die horizontale Radkraft, so wird außerdem deutlich, dass die Belastung der Hinterachswelle in vertikaler Richtung durch das Anheben des Heckgewichts keinen nennenswerten Einfluss auf das Signal für die horizontale Radkraft hat. Der Krafrichtungseinfluss beträgt weniger als 0,2 kN.



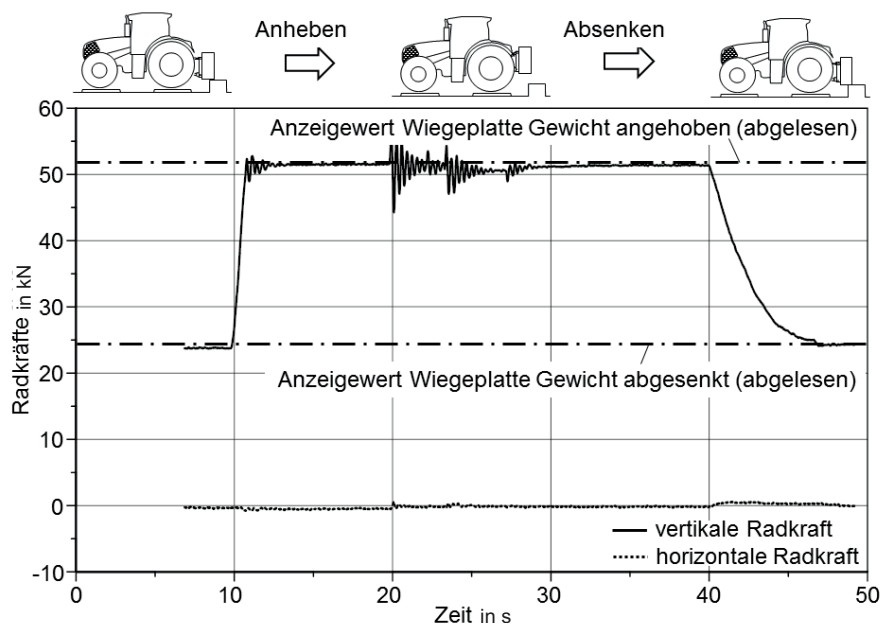


Abbildung 8: Analyse des Signals der Traktionssensorik für die vertikale und horizontale Radkraft beim Anheben und Absenken eines Heckgewichts auf Wiegeplatten nach WIECKHORST et al. (2017)

In Abbildung 9 sind im oberen Diagramm die Signale für die horizontale Radkraft der Traktions-sensorik und das halbierte Zugkraftsignal der mit DMS beklebten Kugelkopfkupplung bei der Fahrt mit einem Bremsanhänger auf Asphalt über der Zeit dargestellt. Im mittleren Diagramm ist die Abweichung des Signals der Traktionssensorik und der mit DMS beklebten Kugelkopfkupplung über der Zeit aufgetragen und im unteren Diagramm die Fahrgeschwindigkeit.

Der Bremsanhänger war mit zwei Retarderachsen ausgerüstet, bei welchen sich die Bremskraft jeweils in vier Stufen einstellen lässt. Der Allradantrieb war während der gesamten Messung deaktiviert, der Reifendruck war an beiden Achsen des Traktors auf 1,6 bar eingestellt und die Fahrgeschwindigkeit betrug während der gesamten Messung 9 km/h (Tempomat aktiviert). Zu Beginn der Messung waren beide Retarderachsen auf Stufe 4 aktiviert und nach etwa 35 s war eine der Retarderachsen abgeschaltet. Das Signal für die horizontale Radkraft folgte dem Signal für die halbierte, an der Kugelkopfkupplung gemessenen, Zugkraft während der gesamten Messfahrt gut. Die Hinterräder des Traktors müssen bei deaktiviertem Allradantrieb neben der Zugkraft des Bremsanhängers auch den Rollwiderstand der Vorderachse überwinden. Die erwartete Differenz zwischen der Radtriebskraft des Hinterrades und der halbierten Gesamtzugkraft an der Kugelkopfkupplung betrug nach Abschätzung der Rollwiderstandskraft der Vorderachse 0,19 bis 0,38 kN. Als Rollwiderstandsbeiwert auf Asphalt wurden hierfür zwischen 1,5 und 3 % angenommen (STEINKAMPF 1986). Die Vorderachslast wurde aus der Schwerpunktlage, den Geometrieparametern und den an der Kugelkopfkupplung wirkenden Kräften berechnet, die während der Messfahrt mit den Dehnungsmessstreifen erfasst wurden. Die von der Traktionssensorik gemessene Radtriebskraft lag im ersten Teil der Messfahrt, mit beiden vollständig aktivierten Retarderachsen, im Mittel 0,21 kN über der halbierten, an der Kugelkopfkupplung gemessenen, Zugkraft und damit im erwarteten Bereich. Nach dem Abschalten der zweiten Retarderachse lag die Abweichung mit 0,7 kN über dem maximal erwarteten Wert von

0,38 kN. Grund hierfür ist die abnehmende Messgenauigkeit der Kraftsignale des Traktionssensors im Bereich zwischen den für die Zweipunktkalibrierung der Signale genutzten Stützstellen.

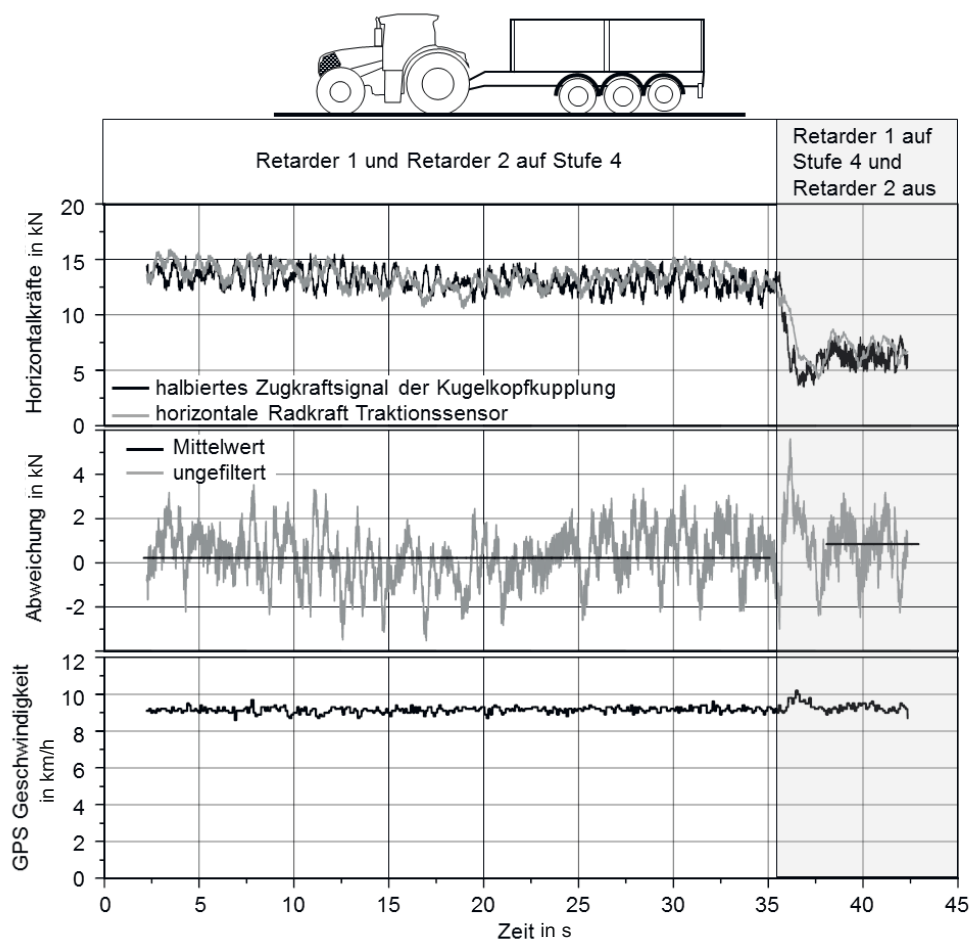


Abbildung 9: Vergleich des Horizontalkraftsignals der Traktionssensorik mit dem Zugkraftsignal einer DMS beklebten Kugelkopfkupplung nach WIECKHORST et al. (2017)

## Ergebnisse aus dem Traktoreinsatz

Die ersten Messfahrten mit dem Versuchstraktor zur Erzeugung von Reifen-Boden-Kennfeldern bei verschiedenen Reifendrücken wurden auf Asphalt durchgeführt, um zunächst alle Einflüsse auf die Signalverläufe aus der Heterogenität des Bodens und auf den Zugkraftbedarf und das Traktionsverhalten auszuschließen. Die Zugkraft wurde mit dem Bremsanhänger bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 12 km/h (Tempomat) aufgebracht. Der Allradantrieb des Traktors ist bei den Messfahrten deaktiviert. Die Retarderachsen des Bremsanhängers sind auf Stufe 4, stärkste Abbremsung, aktiviert. In der ersten Messung betrug der Reifendruck an allen vier Rädern des Traktors 1,6 bar, während für die zweite Messung der Reifendruck auf 0,6 bar abgesenkt wurde.

In Abbildung 10 sind die aus den Messdaten generierten Reifenkennfelder dargestellt. Im linken Diagramm sind die Datenpunkte des Traktionswirkungsgrads über dem Triebkraftbeiwert als Datenpunkte aufgetragen. Im rechten Diagramm wurden die Mittelwerte des Traktionswirkungsgrads über dem Triebkraftbeiwert aufgetragen. Für die Messfahrt mit 1,6 bar Reifendruck ergeben sich im

Mittel Traktionswirkungswirkungsgrade von 85 bis 90 % und für die Messfahrt mit 0,6 bar Reifendruck von 74 bis 76 %, und zwar jeweils bei Triebkraftbeiwerten zwischen 30 und 35 %. Die große Differenz der mit den zwei unterschiedlichen Reifendrücken erreichten Traktionswirkungswirkungsgrade von deutlich über 10 % im gesamten Kennfeld ist plausibel, da die Reifen bei der Messfahrt mit 0,6 bar stark walkten, was zu einem erhöhten inneren Rollwiderstand führte.

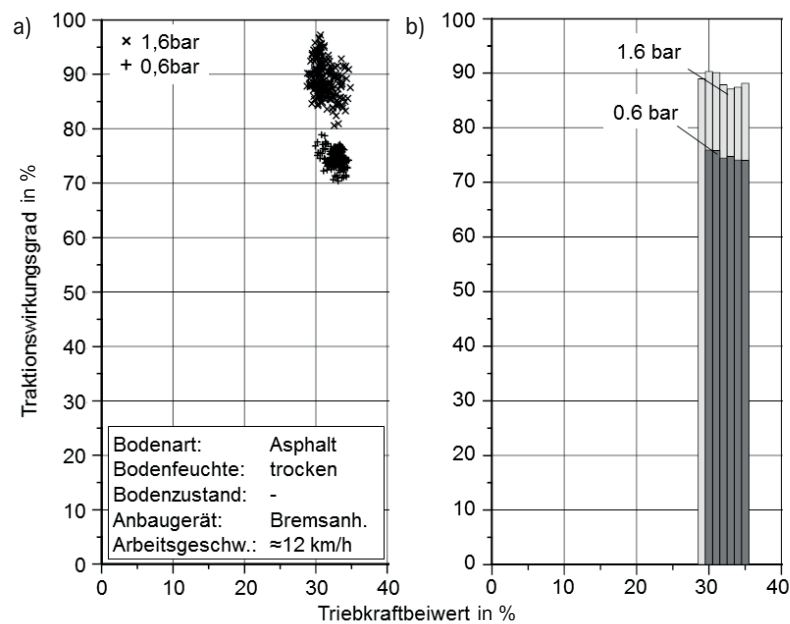


Abbildung 10: Reifenkennfeld bei Zugarbeiten auf Asphalt mit 12 km/h bei unterschiedlichen Reifendrücken – a) Datenpunkte und b) klassierte Daten nach Wieckhorst et al. (2017)

Abbildung 11 zeigt die klassierten Reifen-Boden-Kennfelder aus Messdaten des Versuchstraktors bei der flachen Bodenbearbeitung mit einem angebauten Flügelschargrubber mit 0,7, 0,8, 0,9 und 1,0 bar auf trockenem, lehmigen Sand mit Gerstenstopplern. Die Reifentragfähigkeitsgrenze wurde bei keiner der Messungen überschritten. Der Traktionswirkungswirkungsgrad ist, wie schon zuvor, über dem Triebkraftbeiwert dargestellt. Der Allradantrieb war bei allen vier Messfahrten aktiviert. Die Arbeitsgeschwindigkeit lag bei 10 km/h und die Motorauslastung bei 100 %. Nach jeder Reifendruckänderung wurde die Arbeitstiefe kontrolliert und durch das Einstellen der Länge des Oberlenkers angepasst (Hubwerk in Schwimmstellung).

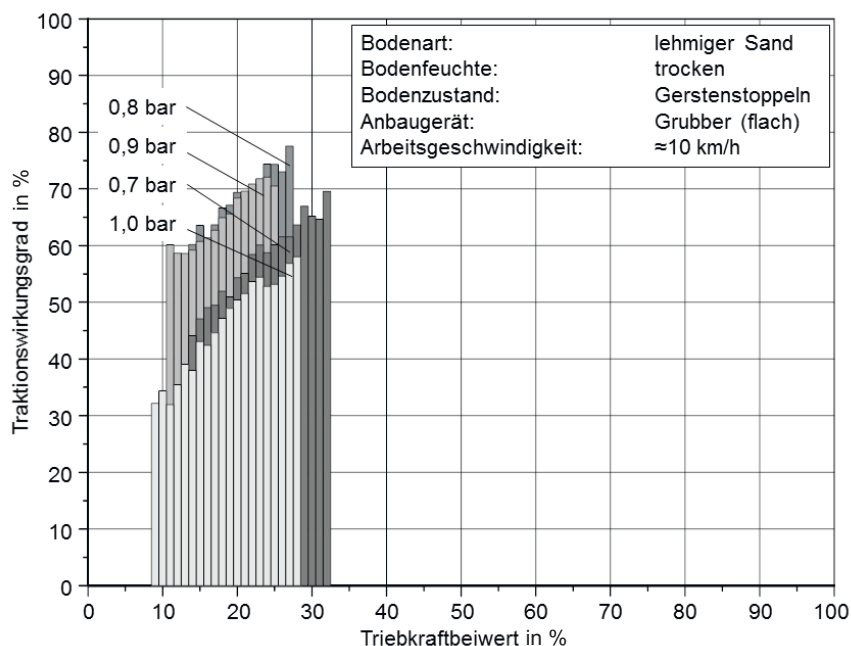


Abbildung 11: Reifenkennfelder der Messfahrten mit verschiedenen Reifendrücken beim flachen Grubbern auf Gerstenstopplern und trockenem lehmigen Sand (WIECKHORST et al. 2017)

Beim Betrachten der Reifen-Boden-Kennfelder fällt zunächst auf, dass der Triebkraftbeiwert bei allen Messfahrten zwischen 10 und 30 % liegt. In diesem Bereich steigt der Verlauf des Traktionswirkungsgrads über dem Triebkraftbeiwert noch an (Abbildung 5). Das Wirkungsgradmaximum der Kurvenverläufe bei höheren Triebkraftbeiwerten wird bei keiner der Messfahrten erreicht. Traktor, Ballastierung und Anbaugerät waren allerdings nicht optimal aufeinander abgestimmt. Maximale Traktionswirkungsgrade ergeben sich für Reifendrücke von 0,8 und 0,9 bar. Der Traktionswirkungsgrad bei der Messfahrt mit 0,7 bar Reifendruck liegt im gesamten Reifen-Boden-Kennfeld mehr als 10 % unter den bei 0,8 und 0,9 bar erreichten Traktionswirkungsgraden. Bei der Messfahrt mit 1,0 bar Reifendruck wurden die geringsten Traktionswirkungsgrade erreicht (Gleichung 4):

$$\sum_{\kappa = 14 \%}^{\kappa = 25 \%} \eta_{T,0,8 \text{ bar}}(\kappa) > \sum_{\kappa = 14 \%}^{\kappa = 25 \%} \eta_{T,0,9 \text{ bar}}(\kappa) > \sum_{\kappa = 14 \%}^{\kappa = 25 \%} \eta_{T,0,7 \text{ bar}}(\kappa) > \sum_{\kappa = 14 \%}^{\kappa = 25 \%} \eta_{T,1,0 \text{ bar}}(\kappa) \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Ergebnisse der Messfahrten beim flachen Grubbern auf trockenem lehmigen Sand mit Gerstenstopplern bestätigen die aus dem Stand der Forschung bekannte Beobachtung, dass minimal zulässiger Reifendruck nicht in jedem Fall auch zu maximalen Traktionswirkungsgraden führt. Bei den gegebenen Bedingungen ist ein Reifendruck von 0,8 bar wirkungsgradoptimal. Die große Differenz der erreichten Traktionswirkungsgrade von über 10 % bei der Reifendruckänderung von 0,7 auf 0,8 bar überraschte jedoch. Aus diesem Grund sollen die Signale der Traktionssensorik in einem folgenden Versuch mit Messfelgen unter Feldbedingungen validiert werden. Die Traktionswirkungsgrade bei unterschiedlichen Reifendrücken können anhand von Reifen-Boden-Kennfeldern bewertet werden, die aus Sensorsignalen generiert werden.

## Schlussfolgerungen

Der Systemwirkungsgrad eines Traktors bei der schweren Bodenbearbeitung wird durch die im Reifen-Boden-Kontakt entstehenden Schlupf- und Rollwiderstandsverluste geprägt. Durch eine Reifendruckanpassung können diese Verluste minimiert und der Traktionswirkungsgrad optimiert werden. Eine Analyse des Stands der Forschung zeigt, dass – entgegen einer weit verbreiteten Faustregel – der minimal zulässige Reifendruck nicht in jedem Fall zu maximalem Traktionswirkungsgrad führt. Welcher Reifendruck zu maximalen Traktionswirkungsgraden führt, hängt von den gegebenen Traktionsbedingungen ab. Für die Optimierung des Traktionswirkungsgrads durch eine Reifendruckanpassung müssen aus Sensordaten Reifen-Boden-Kennfelder für die aktuellen Traktionsbedingungen erzeugt werden. Die aus den Sensordaten generierten klassierten Reifen-Boden-Kennfelder eines Versuchstraktors ermöglichen die Bewertung unterschiedlicher Reifendrücke hinsichtlich der Traktionswirkungsgrade bei homogenen Traktionsbedingungen. Die Qualität und die Genauigkeit der Signale der Traktionssensorik sollen in einem nächsten Schritt mit Messfelgen unter Feldbedingungen validiert werden. Außerdem soll auf Basis der vorliegenden Arbeit die Optimierung des Reifendrucks bei heterogenen Traktionsbedingungen entwickelt und untersucht werden.

## Literatur

- Frerichs, L.; Hanke, S.; Steinhaus, S.; Tröskén, L. (2017): EKOtech – A holistic approach to reduce CO<sub>2</sub> emissions of agricultural machinery in process chains. In: 9<sup>th</sup> AVL International Commercial Powertrain Conference, 10.–11. Mai 2017, S. 85–89
- Peeters, M.; Fedde, T.; Frerichs, L. (2017): Integrated Wheel Load Measurement for Tractors. In: VDI-Berichte Nr. 2300, 10.–11. November 2015, S. 423–430
- Pichlmaier, B. (2012): Traktionsmanagement für Traktoren. Dissertation, Technische Universität München
- Rempfer, M. (2003): Grundlagen der automatischen Reifendruckverstellung bei Traktoren. Dissertation, Technische Universität München
- Steinkampf, H. (1986): Betriebseigenschaften von Ackerschlepperreifen bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen. Landbauforschung Völkenrode (80), S. 354 und 401
- Wettemann, P. (2012): Ackern mit weniger Diesel. Neue Landwirtschaft 4, S. 67–70
- Wieckhorst, J.; Fedde, T.; Frerichs, L.; Fiedler, G. (2015): A Tractive Sensor - Integrated Measurement of Tire Soil Parameters for Tractors. In: VDI-Berichte Nr. 2251, 10.–11. November 2015, Düsseldorf, VDI-Verlag, S. 219–226
- Wieckhorst, J.; Fedde, T.; Frerichs, L. (2017): A Traction Field Test - Real Time Tire Soil Parameters of a Tractor in Tillage Applications. In: VDI-Berichte Nr. 2300, 10.–11. November 2015, S. 431–438

## Autoren

**Dipl.-Ing. Jan Wieckhorst** ist Projektleiter für elektronische Traktor Optimierungssysteme bei CLAAS Traktor in Paderborn, Halberstädter Straße 15–19, 33106 Paderborn und externer Doktorand am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig, E-Mail: jan.wieckhorst@claas.com.

**Dr.-Ing. Thomas Fedde** ist Leiter der Vorentwicklung bei CLAAS Traktor in Paderborn, Halberstädter Straße 15–19, 33106 Paderborn

**Prof. Dr. Ludger Frerichs** ist Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge und Universitätsprofessor an der Technischen Universität Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig

## Hinweis

Das Thema wurde auf der 75. Internationalen Konferenz LAND.TECHNIK – AgEng 2017, Hannover, 10.–11. November, vorgestellt, eine Kurzfassung wurde im VDI-Bericht Nr. 2300 veröffentlicht.